



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 05 892 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7:
H 02 P 9/00
H 02 M 5/44
H 02 J 15/00
F 03 D 7/00

②1 Aktenzeichen: 101 05 892.6
②2 Anmeldetag: 9. 2. 2001
④3 Offenlegungstag: 12. 9. 2002

DE 101 05 892 A 1

⑦1 Anmelder:

DaimlerChrysler Rail Systems GmbH, 13627 Berlin,
DE

⑦2 Erfinder:

Guggisberg, Beat, Untersiggenthal, CH

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

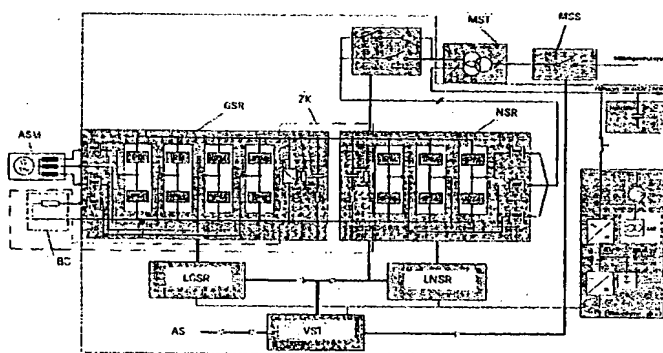
DE 44 28 086 C2
DE 38 33 719 C1
DE 198 33 551 A1
DE 196 51 364 A1
DE 196 24 809 A1
DE 42 10 443 A1
DE 28 53 207 A1
WO 00 19 094 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Windenergieanlage und Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage

⑤7 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Windenergieanlage, in der sichergestellt wird, dass während eines normalen Betriebs eine Leistung bis zu einem vorgegebenen Schwellenwert abgegeben wird, während eines Netzausfalls im Fall einer kurzzeitigen Netzunterbrechung die Windenergieanlage in Betrieb bleibt, jedoch keine Energie an das Netz abgibt und im Fall einer längerfristigen Netzunterbrechung die Windenergieanlage weich abgeschaltet wird. Zu diesem Zweck ist in der Windenergieanlage lediglich ein Zweig ausgebildet, der den Asynchronmotor bzw. Generator mit dem Netz verbindet, so dass eine zuverlässige und schnelle Reaktion auf wechselnde Netzzustände möglich ist. Dieser Zweig weist einen Generatorstromrichter (GSR), einen Zwischenkreis (ZK) sowie einen Netzstromrichter (NSR) auf. Zur Umwandlung von überschüssiger Energie, die nicht in das Netz eingespeist werden kann, ist, um eine Abschaltung bei kurzzeitigen Netzunterbrechungen zu verhindern bzw. eine weiche Abschaltung bei einer längerfristigen Netzunterbrechung zu ermöglichen, ein Momentanüberspannungsbegrenzer (BC) im Zwischenkreis ausgebildet, in dem diese in Wärmeenergie umgewandelt wird. Darüber hinaus ist ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage offenbart.



DE 101 05 892 A 1

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Erzeugung elektrischer Energie, insbesondere Windenergieanlagen zur Erzeugung und Einspeisung elektrischer Energie in ein Stromversorgungsnetz und ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage.

[0002] Herkömmlich werden bei drehzahlvariablen Antrieben verschiedenster Art, wie beispielsweise Industrieantrieben, Traktion, usw., selbstgeführte Stromrichter zur Drehzahl- und/oder Leistungsregelung eingesetzt. Im ausschliesslich generatorischen Betrieb, beispielsweise bei einer Windenergieanlage, werden derzeit überwiegend Systeme mit einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine DASM eingesetzt, wie sie in Fig. 6 gezeigt ist. Hierbei wird ein Rotor R, bei dem der Einstellwinkel der Rotorblätter über eine Anlagensteuerung AS einstellbar ist, durch Wind angetrieben. Seine Drehung wird über ein Getriebe G mit einem Übersetzungsverhältnis von $1:n$ (wobei n Werte zwischen 50 und 100 annimmt) zum Antrieb der doppelt gespeisten Asynchronmaschine DASM verwendet. Die Ist-Drehzahl $n_{\text{Gen}}(\text{ist})$ des Generators DASM wird dabei erfasst und der Anlagensteuerung AS zugeführt. Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine DASM ist einerseits direkt mit einem Mittelspannungstrafo MST und einer Mittelspannungsschaltanlage MSS mit einer Spannung von 6 bis 30 kV verbunden, wobei diese Verbindung schaltbar ist. Die Windenergieanlage ist im Betrieb immer mit der Mittelspannung verbunden. Das Mittelspannungsnetz dient der Einspeisung der produzierten Energie. Parallel zu dieser Verbindung ist ein weiterer Zweig ausgebildet, in dem ein Generatorstromrichter GSR, ein Zwischenkreis ZK sowie ein Netzstromrichter NSR ausgebildet ist. Der Generatorstromrichter GSR sowie der Netzstromrichter NSR werden jeweils mittels einer Leittechnikeinrichtung LGSR bzw. LNSR angesteuert, wobei als Sollwerte die Soll-Leistung und die Soll-Drehzahl verwendet werden. Die Leittechnikeinrichtung LGSR und LNSR sowie die Anlagensteuerung AS werden jeweils über den Mittelspannungstrafo MST und die Mittelspannungsschaltanlage MSS mit Energie versorgt.

[0003] Ebenfalls ist herkömmlich bei Windenergieanlagen, d. h. für den generatorischen Betrieb, das sogenannte "dänische Konzept" sehr weit verbreitet, bei dem eine schleifringlose Asynchronmaschine ASM ohne Stromrichter mittels einer Synchronisations- bzw. Hochlaufeinrichtung HL direkt mit der Netzspannung verbunden ist, wie in Fig. 7 gezeigt ist. Hierbei ist ein Rotor R über ein Getriebe G mit einem Übersetzungsverhältnis von $1:n$ (wobei n Werte zwischen 50 und 100 annimmt) mit einer 4- bzw. 6-poligen Asynchronmaschine ASM verbunden ist. Die drei Ausgangsphasen dieser Asynchronmaschine ASM können entweder über einen ersten Zweig mit einem Mittelspannungstrafo MST und einer Mittelspannungsschaltanlage MSS mit einer Spannung von 6 bis 30 kV verbunden werden oder alternativ über einen zweiten Zweig mit der Hochlaufeinrichtung HL, wobei die Hochlaufeinrichtung HL eine Schalteinrichtung S1 zum Öffnen und Schliessen des ersten Zweiges steuert. Einer Anlagensteuerung AS wird eine Generator-Istdrehzahl $n_{\text{Gen}}(\text{ist})$ zugeführt und diese steuert entsprechend darauf die Hochlaufeinrichtung HL sowie eine weitere Schalteinrichtung S2 an, so dass auch über den zweiten Zweig eine Verbindung mit dem Mittelspannungstrafo MST und der Mittelspannungsschaltanlage MSS ausgebildet werden kann.

[0004] Aus der DE 196 51 364 A1 ist beispielsweise eine Vorrichtung zur Verbesserung der Netzverträglichkeit von Windenergieanlagen mit Asynchrongeneratoren, die an ein Stromversorgungsnetz angeschlossen sind, bekannt. In die-

ser Vorrichtung ist ein rechnergesteuerter Umrichter mit einem Gleichstromzwischenkreis und ein Zwischenspeicher ausgebildet. Der Zwischenspeicher dient im wesentlichen dazu, kurzfristige, vom Leistungsmittelwert abweichende positive Leistungsschwankungen aufzunehmen und zeitversetzt wieder abzugeben. Zudem ist offenbart, dass kurzfristige Leistungsspitzen höherer Ordnung bei geladenem Zwischenspeicher mittels eines passiven Bauelements abgeleitet werden, d. h. in Wärme umgesetzt werden, wobei das Bauelement als Heizelement, d. h. ohmscher Widerstand ausgebildet sein kann.

[0005] Weiterhin ist aus der EP 0 884 833 A1 eine Windenergieanlage mit einer Generatorregelvorrichtung mit einem Stromrichter mit aktiven Schaltern bekannt. Dabei ist die Generatorregelvorrichtung zur Regelung der Energieabgabe eines Mehrphasengenerators der Windenergieanlage betätigbar ist, um das Drehmoment des Rotors über den Einstellwinkel der Rotorblätter zu regeln.

[0006] Zudem offenbart die WO 00/19094 eine Windenergieanlage mit einem vom Wind antreibbaren Rotor mit verstellbaren Rotorblättern und einem mit dem Rotor direkt oder indirekt verbundenen Generator zur Erzeugung elektrischer Energie. Dabei ist eine Leistungsabgabe des Generators bei variabler Rotordrehzahl möglich. Zudem weist die Windenergieanlage eine Steuerlogik auf, mittels derer die Leistungsabgabe und die Rotordrehzahl unterhalb einer vorgegebenen Grenzgeschwindigkeit, soweit möglich, konstant auf eine Nennleistung/Nennndrehzahl und oberhalb der Grenzgeschwindigkeit bis zur Abschaltgeschwindigkeit im wesentlichen linear abnehmend geregelt ausgebildet ist.

[0007] Bei diesen herkömmlichen Windenergieanlagen mit selbstgeführten Stromrichtern besteht jedoch dahingehend ein Problem, dass auch bei kurzen Netzunterbrechungen das gesamte System abgeschaltet und beim Wiedereinschalten neu synchronisiert werden muss und bei Netzausfall die Lastabschaltung abrupt erfolgt.

[0008] Daher ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Windenergieanlage, bei der bei kurzzeitigen Netzunterbrechungen keine Abschaltung des gesamten Systems und Neusynchronisation beim Wiedereinschalten erforderlich ist und bei Netzausfall keine abrupte Lastabschaltung erfolgt, sowie ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage auszubilden.

[0009] Diese Aufgabe wird durch eine Windenergieanlage mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 sowie ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage mit den Merkmalen des Patentanspruchs 7 gelöst. In den Unteransprüchen sind vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung angegeben.

[0010] Durch die erfindungsgemässe Ausgestaltung kann die Windenergieanlage bei kurzzeitigen Netzunterbrechungen durch den Betrieb eines Generatorstromrichters und eines Bremschoppers auf der Nennndrehzahl gehalten werden. Zudem kann innerhalb weniger ms nach Rückkehr der Netzspannung Energie ins Netz zurückgespeist werden. Bei einem Netzausfall wird das Drehmoment linear im Sekundenbereich auf Null reduziert, d. h. es erfolgt eine Sanftabschaltung, wobei die während dieser Zeit generatorisch anfallende Energie durch den Bremschopper in Wärmeenergie umgesetzt wird. Insbesondere ist durch den Wegfall einer direkten, schaltbaren Verbindung zwischen Asynchronmotor und Mittelspannungstrafo und Mittelspannungsschaltanlage eine schnellere Reaktion auf sich ändernde Netzzustände, vor allem Netzunterbrechungen und eine Wiederherstellung einer Netzverbindung möglich.

[0011] Bei der erfindungsgemässen Windenergieanlage wird im Fall von kurzen Netzunterbrechungen eine Abschaltung vollständig vermieden, während im Fall von län-

geren Netzunterbrechungen durch eine Sanftabschaltung des Drehmoments Laststöße vermieden und Schwingungsanregungen auf dem gesamten Triebstrang verringert werden. Dadurch erhöht sich unter anderem auch die Lebensdauer des mechanischen Systems erheblich.

[0012] Diese und weitere Aufgaben, Vorteile und Merkmale der Erfindung werden aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele in Verbindung mit der Zeichnung ersichtlich.

[0013] Es zeigen:

[0014] Fig. 1 ein Blockschaltbild einer erfindungsgemässen Windenergieanlage mit Asynchronmaschine,

[0015] Fig. 2 eine Drehzahl-Leistungs- und Drehzahl-Drehmoment-Steuerkennlinie in der erfindungsgemässen Windenergieanlage,

[0016] Fig. 3 einen Verlauf der Einspeiseleistung und der Maximalleistung in der erfindungsgemässen Windenergieanlage,

[0017] Fig. 4 das Verhalten der erfindungsgemässen Windenergieanlage bei kurzzeitiger Netzunterbrechung,

[0018] Fig. 5 das Verhalten der erfindungsgemässen Windenergieanlage bei längerem Netzausfall,

[0019] Fig. 6 ein Blockschaltbild einer herkömmlichen Windenergieanlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine und

[0020] Fig. 7 ein Blockschaltbild einer herkömmlichen Windenergieanlage nach dem "dänischen Konzept".

[0021] Im folgenden wird nun eine erfindungsgemässe Windenergieanlage, insbesondere einer erfindungsgemässe Windenergieanlage mit Asynchronmaschine genauer beschrieben.

[0022] Eine erfindungsgemässe Windenergieanlage, wie in Fig. 1 im Blockschaltbild gezeigt, umfasst einen vom Wind angetriebenen Rotor R (nicht gezeigt), der über eine Welle und ein Getriebe mechanisch mit einer Asynchronmaschine ASM gekoppelt ist. Die Asynchronmaschine ASM ist mit dem Generatorstromrichter GSR verbunden. Am selben Zwischenkreis ZK ist auch der Netzstromrichter NSR angeschlossen. Der Netzstromrichter NSR ist über einen Mittelspannungstrafo MST sowie eine Mittelspannungsschaltanlage MSS an ein öffentliches Stromversorgungsnetz (Mittelspannungsnetz) angeschlossen. Die erfindungsgemässe Windenergieanlage ist dabei als Ganzes bezüglich Schutz, Netzurückwirkungen und Netzanschluss (Kurzschlussleistung des zu speisenden Netzes) entsprechend vorgegebenen Anforderungen abgestimmt.

[0023] Im Gegensatz zu herkömmlichen Windenergieanlagen weist die erfindungsgemässe Windenergieanlage jedoch keinen Zweig auf, über den mittels einer Schalteinrichtung eine direkte Verbindung zwischen Asynchronmaschine ASM und Mittelspannungstrafo MST und Mittelspannungsschaltanlage MSS herstellbar ist.

[0024] Die erfindungsgemässe Windenergieanlage umfasst in ihrem einzigen Zweig, über den der Netzstromrichter NSR mit dem Mittelspannungstrafo MST und der Mittelspannungsschaltanlage MSS verbunden ist, einen (Hochleistungs-)Stromrichter mit einem Netzstromrichter NSR, einem Motor- bzw. Generatorstromrichter GSR, einen Bremschopper BC in einem Zwischenkreis ZK sowie zugehörige Leiteinrichtungen LNSR und LGSR und eine Verbindungssteuereinrichtung VSt als Schnittstelle zu einer Anlagensteuerung AS und zur Mittelspannungs(kompakt)anlage MSS und erlaubt einen drehzahlvariablen Betrieb einer schleifringlosen Asynchronmaschine ASM (Käfigläufer).

[0025] Als Generator ASM kann beispielsweise eine fremdbelüftete Asynchronmaschine eingesetzt werden. Hierbei ist der Rotor vorteilhafterweise derart ausgestaltet, dass eine gleichzeitige, forcierte Belüftung von Stator und

Rotor möglich ist. Durch eine derartige kompakte Bauweise des Generators ASM kann das Gewicht des Triebstranges erheblich reduziert werden und daher ist im Gegensatz zu herkömmlichen Windenergieanlagen ein Einbau des Mittelspannungstrafo MST in die Gondel möglich. Durch das Konzept eines Netzstromrichters NSR und eines Generatorstromrichters GSR ist zudem ein drehzahlvariabler Betrieb über den gesamten Drehzahlbereich des Generators ASM möglich.

[0026] Der (Hochleistungs-)Stromrichter weist Hochleistungsschalter auf und ist beispielsweise, wie in Fig. 1 gezeigt, in IGBT-Technologie mit hochsperrenden Integrated Power Modulen (IPM) bzw. integrierten Hochleistungsschaltern beispielsweise als Modular Power Converter (MPC) bzw. modularer Hochleistungsstromrichter aufgebaut. Ein integrierter Hochleistungsschalter ist beispielsweise für eine maximale Sperrspannung von 4,5 kV konzipiert. Der maximale Schaltstrom beträgt dann 1,5 kA bei einer Zwischenkreisspannung von 3,4 kV. Die Ansteuerung des IGBT erfolgt über eine Gate-Elektronik bzw. ein Gate-Drive, das parallelgeschaltete integrierte Hochleistungsschalter ansteuert, Kurzschlüsse erfasst, Kurzschlüsse selbstständig abschaltet (soft turn-off), Ansteuersignale und Rückmeldungen über Lichtwellenleiter ausgibt bzw. empfängt, Unterspannungen erfasst, meldet und Zustände aufrecht erhält und die Kollektor-Emitter-Spannung (Uce) und Schutzzeiten überwacht und auf einen Maximalwert begrenzt.

[0027] Die Leistungsaufnahme der Ansteuerung beträgt beispielsweise ca. 6 W. Parallelgeschaltete Hochleistungsschalter werden von einer Gate-Adaptiereinrichtung angesteuert, die einen Gateüberspannungsschutz sowie einen Gateabschlusswiderstand beinhaltet.

[0028] Der Leistungsteil der erfindungsgemässen Windenergieanlage besteht im bevorzugten Ausführungsbeispiel gemäss Fig. 1 im wesentlichen aus mehreren Phasenmodulen, die mit integrierten Hochleistungsschaltern und jeweils einer dazu parallelen Freilaufdiode bestückt sind. Desweiteren umfassen der Generator- und der Netzstromrichter GSR, NSR Zwischenkreiskondensatoren, Strom- und Spannungssensoren, eine niederinduktive Zwischenkreisverschönerung und eine Kühlmittelverrohrung. Darüber hinaus ist ein Abtrenn- und Vorladeschutz ausgebildet, das für ein sanftes Zuschalten des selbstgeführten Stromrichters an das speisende Netz benötigt wird.

[0029] Der Netzstromrichter NSR und der Mittelspannungstrafo MST sind die Hauptbestandteile der Netzanbindung. Der Mittelspannungstrafo MST besitzt eine relativ hohe Kurzschlussleistung, die den stromrichterseitigen Kurzschlussstrom begrenzt und die Netzoberschwingungsströme reduziert. Zudem verfügt er über eine kombinierte Hilfsbetriebe- und Filterwicklung. Diese Wicklung dient zur Versorgung der Windenergieanlage mit Hilfsenergie (3 · 400 Veff/50 Hz) und einem Anschluss von Filterkondensatoren zur Reduktion von Netzoberschwingungen.

[0030] Die Mittelspannungs(kompakt)schaltanlage MSS weist eine Fernauslösung auf und ermöglicht ein sicheres und rasches Trennen der gesamten elektrischen Ausrüstung der Windenergieanlage vom Mittelspannungsnetz. Die Mittelspannungs(kompakt)schaltanlage MSS ist in der Regel im Turmfuss untergebracht.

[0031] Die erfindungsgemässe Windenergieanlage ist in Fig. 1 als Blockschaltbild gezeigt. Diese erfindungsgemässe Windenergieanlage ist mit drei Rotorblättern ausgerüstet, die über ein dreistufiges Getriebe G einen Asynchronmotor bzw. Generator ASM antreiben. Der Generator ASM, ein selbstgeführter (Hochleistungs-)Stromrichter sowie ein Mittelspannungstrafo MST befinden sich im bevorzugten Aus-

führungsbeispiel in einer Gondel der Windenergieanlage. Eine Mittelspannungs(kompakt)schaltanlage MSS ist im Turmfuss untergebracht.

[0032] Dieser beispielhafte erfindungsgemässe Aufbau ist bezüglich Einbauort (z. B. Vibration der in der Gondel eingebauten Teile) und Umgebungsbedingungen angepasst und besteht aus den folgenden Komponenten:

- Generator, beispielsweise schleifringlose Asynchronmaschine (Käfigläufer), ASM
- Selbstgeführter (Hochleistungs-)Stromrichter bestehend aus Generatorstromrichter GSR und Netzstromrichter NSR jeweils mit Leittechnik LSGR, LNSR und einem Zwischenkreis ZK
- Kühlsysteme für den selbstgeführten (Hochleistungs-)Stromrichter, den Mittelspannungstrafo MST und den Generator ASM, ohne Wasser-Luft-Wärmetauscher
- Mittelspannungstrafo MST zur Anpassung der Hochleistungsstromrichterausgangsspannung an das gewünschte Mittelspannungsniveau
- Hilfsspannungsversorgung $3 \cdot 400 \text{ Veff}/50 \text{ Hz}$ ab dem Mittelspannungstrafo MST (eventuell ab einem Kleintrafo)
- Lüfter, Zyklonfilter und Luftkanäle zur Belüftung des Generators ASM und des (Hochleistungs-)Stromrichters
- Verkabelung Generator-Stromrichter und Stromrichter-Mittelspannungstrafo
- Mittelspannungs(kompakt)schaltanlage MSS (im Turmfuss), komplett gekapselt
- Vollisoliertes Mittelspannungskabel für die Montage im Inneren des Turmes

[0033] Die erfindungsgemässe Windenergieanlage erlaubt einen drehzahlvariablen Betrieb. Durch diesen drehzahlvariablen Betrieb ist eine vollständige Beseitigung bzw. zumindest eine bedeutende Reduzierung mechanischer Laststösse auf den Triebstrang, die Rotorblätter, den Maschinenträger und den Turm erreichbar. Bei der erfindungsgemässen Windenergieanlage ist im Gegensatz zum Stand der Technik ein unterbrechungsfreier Betrieb der Windenergieanlage realisierbar, wenn es sich um Kurz-Netzunterbrechungen im Bereich von ungefähr 20 bis 200 ms handelt, wobei dieser Wert durch die maximal vom Bremschopper absorbierbare Energie bestimmt ist. Bei längeren Netzunterbrechungen bzw. Netzausfall erfolgt eine sanfte Abschaltung des Drehmoments, um Schwingungserscheinungen aufgrund einer Überlagerung möglicher Eigenfrequenzen des Generator-Stromrichter-Systems mit Komponenten der Windenergieanlage zu vermeiden. Zudem wird in der erfindungsgemässen Windenergieanlage die Rotorblatt-Eigenfrequenz von ca. 3 kHz aktiv gedämpft.

[0034] Im folgenden wird nun genauer auf die Steuerung und Regelung der erfindungsgemässen Windenergieanlage eingegangen.

[0035] Die Steuerung und Regelung der erfindungsgemässen Windenergieanlage beruht auf einer übergeordneten Drehzahlregelung. Mit einer Verstellung der Rotorblätter (Pitch-Control) ist die Drehzahl in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit regelbar. Diese Funktion wird von der Anlagensteuerung AS übernommen. Eine untergeordnete Regelung eines Umrichters führt die Ausgangsleistung des Generatorstromrichters GSR gemäss einer in der Leittechnik abgelegten Steuerkennlinie entsprechend einer aktuellen Drehzahl nach. Eine derartige Steuerkennlinie ist in Fig. 2 für Dauer- und Kurzzeitbetrieb ($< 10 \text{ s}$) gezeigt. Eine Erfassung der Drehzahl geschieht unabhängig jeweils für die An-

lagensteuerung AS (extern) und den Generatorstromrichter GSR.

[0036] Eine einen Nennpunkt P_n übersteigende Drehzahl bzw. Leistung wird lediglich kurzzeitig ($< 10 \text{ s}$) gefahren. Die Zeitdauer ist dabei durch die Ausregelzeit der Blattverstellung definiert.

[0037] Bei der inneren Drehmomentregelung wird eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ erreicht. Für die Einspeisung ins Netz ist jedoch eine höhere Genauigkeit erforderlich. Dies wird erreicht, indem die Berechnung der Netzstromrichterleistung zur Korrektur hinzugezogen wird. Zusätzlich wird ein Gleichstrom- bzw. DC-Offset aller Strom- und Spannungswandler im ausgeschalteten Zustand (Taktsperrung für Netzstromrichter NSR und Generatorstromrichter GSR) automatisch auf Null abgeglichen.

[0038] Die Festlegung der Steuerkennlinie gemäss Fig. 2 erfolgt wie die restliche Parameterisierung der Generatorstromrichter-Software von extern über einen Personalcomputer. Die Parameterisierung der Steuerkennlinie kann prinzipiell mit n-Geradenstücken oder durch eine mathematisch geschlossene Formel erfolgen.

[0039] Die Regelung des Generatorstromrichters GSR gewährleistet die aktive Bedämpfung von Systemeigenfrequenzen im Bereich von 2 bis 10 Hz (z. B. Rotorblatteigenfrequenzen). Im Gegensatz zur feldorientierten Regelung ist die hier angewendete ständerflussorientierte Regelung wesentlich dynamischer und führt dadurch zu einer inhärenten Dämpfung des Systems im genannten Frequenzbereich. Der genannte Frequenzbereich ist hierbei eine Richtangabe. Mit dieser hochdynamischen Regelkonfiguration wurden in anderen Anwendungen bereits Frequenzen bis zu 50 Hz gedämpft.

[0040] Der Netzstromrichter NSR formt die Gleich- bzw. DC-Spannung des Zwischenkreises ZK (z. B. 2800 V) in eine 3-phasige Wechselspannung um. Die Hauptregelgrösse für den Netzstromrichter NSR ist die Zwischenkreisspannung bzw. deren Konstanzhaltung. Sobald diese ins Netz eingespeiste Leistung, d. h. eine Leistung des Netzstromrichters NSR einen Wert von $P_{\max 1}$ überschreitet, wie in Fig. 3 gezeigt, wird der der Bremschopper bzw. Momentanüberspannungsbegrenzer BC aktiviert und eine Differenzleistung $P - P_{\max 1}$ in einem Widerstand in Wärme umgesetzt. $P_{\max 2}$ ist die Obergrenze der Maximalleistung, die im Momentanüberspannungsbegrenzer BC in Wärme umgesetzt werden kann. Für die gesamte Windenergieanlage ergibt sich durch das vorstehend beschriebene Verhalten ein ausgezeichnetes Kurzzeit-Flickerverhalten. Der vorgegebene Wert $P_{\max 1}$, der die maximale Einspeiseleistung festlegt, kann je nach Anwendung auch hin zu grösserer Leistung verschoben werden.

[0041] Jedoch besteht im Fall einer Netzunterbrechung, unabhängig von deren Dauer, auch bei der vorstehenden Regelung immer noch das Problem, dass dann eine Leistung ins Netz eingespeist würde, da der Wert $P_{\max 1}$ unterschritten ist, und dieses Problem bisher nur durch eine Hartabschaltung der Windenergieanlage bei Erfassung einer Netzunterbrechung beseitigt wurde. Die damit verbundenen, vorstehend bereits diskutierten Nachteile, nahm man in Kauf.

[0042] Um diese Nachteile herkömmlicher Windenergieanlagen zu beseitigen, wird daher in der erfindungsgemässen Windenergieanlage im Fall von Netzunterbrechungen durch die Anlagensteuerung AS zwischen zwei verschiedenen Fällen unterschieden:

- 1) Kurzzeitige Netzunterbrechung während einer Zeitdauer $t_1 \leq t_{\max}$ mit $t_{\max} = 200 \text{ ms}$.
- 2) Länger andauernde Netzunterbrechung bzw. Netzausfall, $t_1 > t_{\max}$.

[0043] Bei kurzzeitigen Netzunterbrechungen kann die erfindungsgemässe Windenergieanlage unterbrechungsfrei betrieben werden. In diesem Fall wird die Windenergieanlage derart geregelt, dass generatorisch anfallende Energie durch den Bremschopper bzw. Momentanüberspannungsbegrenzer BC in Wärme umgesetzt, indem hierfür die maximale Einspeiseleistung P_{\max} gleich Null gesetzt wird. Hierbei ist der Momentanüberspannungsbegrenzer BC derart ausgestaltet, dass er einen Betrieb mit Nennleistung, d. h. eine Aufnahme der Nennleistung P_n durch den Widerstand, bis zu Netzunterbrechungen von 200 ms Dauer erlaubt.

[0044] Das Verhalten der erfindungsgemässen Windenergieanlage bei einer derartigen kurzzeitigen Netzunterbrechung wird nun im folgenden unter Bezugnahme auf Fig. 4 näher erläutert. In Fig. 4 bezeichnet U die Netzspannung, P_{NSR} die Leistung des Netzstromrichters NSR, $P_{Chopper}$ die Leistung des Bremschoppers bzw. Momentanüberspannungsbegrenzers BC und P_d die Leistung im Zwischenkreis.

[0045] Bei einer kurzzeitigen Netzunterbrechung mit einer Dauer $t \leq t_{\max}$ ist die Anlagensteuerung AS weiterhin bestrebt, die Drehzahl des Rotors R konstant zu halten. Dadurch bleibt die Leistung P_d im Zwischenkreis ZK konstant, da die Windenergieanlage trotz Netzausfalls weiter Energie erzeugt. Damit die Spannung im Zwischenkreis ZK nicht unzulässig ansteigt, wird diese Energie im Widerstand des Momentanüberspannungsbegrenzers BC in Wärme umgesetzt. Selbstverständlich ist eine derartige "Energieumwandlung" nicht beliebig oft innerhalb kurzer Zeit möglich. Die maximal zulässige Anzahl von kurzzeitigen Netzunterbrechungen beträgt beispielsweise 3x pro 5 min, wobei sie jedoch von der Dimensionierung des Widerstands und seiner Erwärmung durch die "Energieumwandlung" abhängt. Ein Überschreiten dieses beispielhaften, vorgegebenen Werts kann infolge Überhitzung des Momentanüberspannungsbegrenzer-Widerstandes zu einer Abschaltung der Windenergieanlage führen. Die Anlagensteuerung AS kann in diesem Fall die Windenergieanlage nach der Abkühlung des Widerstands selbsttätig wieder in Betrieb setzen.

[0046] Aus Fig. 4 ist ersichtlich, dass während des Ausfalls der Netzspannung U über eine Zeitdauer t_1 , während die Leistung P_d im Zwischenkreis ZK konstant bleibt, die Leistung P_{NSR} des Netzstromrichters NSR auf Null geht, während die Leistung $P_{Chopper}$ des Momentanüberspannungsbegrenzers auf den Wert von P_{NSR} vor Beginn von t_1 ansteigt. Nach Beendigung des Ausfalls steigt die Leistung P_{NSR} allmählich wieder an, während sich $P_{Chopper}$ in demselben Masse verringert, bis der Zustand vor Beginn von t_1 wieder hergestellt ist.

[0047] Der (Hochleistungs-)Stromrichter der erfindungsgemässen Windenergieanlage ist zudem so bemessen, dass er trotz Ausfall der Kühlung (die Hilfssysteme wie Lüfter, Kühlmittelpumpen, usw. sind an der Hilfswicklung des Mittelspannungstrafo MST angeschlossen) für die Zeitdauer von mindestens t_{\max} mit der Nennleistung P_n arbeiten kann (Generatorstromrichter GSR und Momentanüberspannungsbegrenzer BC).

[0048] Auf diese Weise kann in der erfindungsgemässen Windenergieanlage eine Abschaltung aufgrund einer kurzfristigen Netzunterbrechung vermieden werden. Zu berücksichtigen ist nun noch der Fall, in dem eine Netzunterbrechung länger andauert, so dass eine Energieumwandlung durch den Momentanüberspannungsbegrenzer BC aufgrund der Erwärmung nicht mehr möglich ist. Auf diesen Fall wird im folgenden genauer eingegangen.

[0049] Üblicherweise führt ein Netzausfall, d. h. eine länger dauernde Netzunterbrechung, während dem generatorischen Betrieb einer Asynchronmaschine, beispielsweise in

einer herkömmlichen Windenergieanlage, zu einer abrupten Lastabschaltung. Diese Lastabschaltung kann, verursacht durch die schnelle Änderung des Drehmoments, Schwingungen im mechanischen Teil der Windenergieanlage hervorrufen und dadurch das mechanische System erheblich belasten. Daher erfolgt in der erfindungsgemässen Windenergieanlage im Fall eines Netzausfalls durch die Anlagensteuerung AS eine lineare Reduktion des Drehmoments im Sekundenbereich auf Null, d. h. eine Sanftabschaltung. Dabei wird die während dieser Zeit generatorisch anfallende Energie durch den Momentanüberspannungsbegrenzer BC in Wärme umgesetzt und Schwingungen im mechanischen Teil werden verhindert oder zumindest deutlich reduziert.

[0050] Sofern ein Netzausfall länger als beispielsweise im beschriebenen Ausführungsbeispiel 200 ms andauert, wird über ein Rückmeldesignal "Signalisation Netzausfall" die Anlagensteuerung AS dazu veranlasst, den Rotor R in einen Trudlbetrieb zu fahren. Der (Hochleistungs-)Stromrichter selbst fährt das Drehmoment mit einer Rampenfunktion gesteuert und langsam auf Null, wie in Fig. 6 für den Fall eines länger andauernden Netzausfalls gezeigt. Die Zeit t_2 , bis das Drehmoment und damit die Leistung P_d im Zwischenkreis ZK sowie die Leistung $P_{Chopper}$ im Momentanüberspannungsbegrenzer BC, auf Null heruntergefahren ist, ist auf beispielsweise maximal 3 Sekunden einstellbar. Die erzeugte Energie wird wiederum im Widerstand des Momentanüberspannungsbegrenzers BC in Wärme umgesetzt. Diese erfindungsgemässe, sanfte Reduzierung des Drehmomentes an der Generatorwelle hilft mit, den Rotor schneller abzubremesen und verhindert eine Anregung von Resonanzen, wie sie bei einem 100% Lastabwurf auftreten können.

[0051] Zusammenfassend offenbart die vorliegende Erfindung somit eine Windenergieanlage, in der sichergestellt wird, dass während eines normalen Betriebs eine Leistung bis zu einem vorgegebenen Schwellenwert abgegeben wird, während eines Netzausfalls im Fall einer kurzzeitigen Netzunterbrechung die Windenergieanlage in Betrieb bleibt, jedoch keine Energie an das Netz abgibt und im Fall einer längerfristigen Netzunterbrechung die Windenergieanlage weich abgeschaltet wird. Zu diesem Zweck ist in der Windenergieanlage lediglich ein Zweig ausgebildet, der den Asynchronmotor bzw. Generator mit dem Netz verbindet, so dass eine zuverlässige und schnelle Reaktion auf wechselnde Netzzustände möglich ist. Dieser Zweig weist einen Generatorstromrichter, einen Zwischenkreis sowie einen Netzstromrichter auf. Zur Umwandlung von überschüssiger Energie, die nicht in das Netz eingespeist werden kann, ist, um eine Abschaltung bei kurzzeitigen Netzunterbrechungen zu verhindern bzw. eine weiche Abschaltung bei einer längerfristigen Netzunterbrechung zu ermöglichen, ein Momentanüberspannungsbegrenzer im Zwischenkreis ausgebildet, in dem diese in Wärmeenergie umgewandelt wird. Darüber hinaus ist ein Verfahren zum Betreiben einer Windenergieanlage offenbart.

Patentansprüche

1. Windenergieanlage, mit:
einem Rotor mit verstellbaren Rotorblättern,
einer durch den Rotor über eine Welle angetriebenen Asynchronmaschine (ASM),
einem selbstgeführten Stromrichter, der einen Generatorstromrichter (GSR), einen Zwischenkreis (ZK) mit einer Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) sowie einen Netzstromrichter (NSR) aufweist, der zwischen die Asynchronmaschine (ASM) und einen Mittelspannungstrafo (MST) und eine diesem nachgeschaltete Mittelspannungsschaltanlage

(MSS) geschaltet ist, einer Steuer- und Regeleinrichtung (LGSR, LNSR, VSt), zur Erfassung eines Netzausfalls und zur Ermittlung, ob ein Netzausfall länger als eine vorbestimmte erste Zeitdauer (t_{max}) andauert, und zur Ausgabe eines diese Informationen anzeigenden Signals an eine Anlagensteuereinrichtung (AS), wobei die Anlagensteuereinrichtung (AS) ausgebildet ist zur Ansteuerung einer Energieerzeugung durch die Asynchronmaschine (ASM), zur Ansteuerung des selbstgeführten Stromrichters und zur Ansteuerung der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) und, wenn das Signal von der Steuer- und Regeleinrichtung (LGSR, LNSR, VSt) einen Netzausfall anzeigt, der kürzer als die vorbestimmte erste Zeitdauer (t_{max}) ist, die Leistung im Zwischenkreis (ZK) konstant hält und die Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) derart ansteuert, dass die Leistung im Zwischenkreis (ZK) anstelle dem Netzstromrichter (NSR) der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) zugeführt und dort die elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird, oder wenn das Signal von der Steuer- und Regeleinrichtung (LGSR, LNSR, VSt) einen Netzausfall anzeigt, der länger als die vorbestimmte erste Zeitdauer (t_{max}) ist, eine Verstelleinrichtung für die Rotorblätter derart ansteuert, dass der Rotor über eine Verstellung der Rotorblätter in einem Trudelbetrieb gefahren wird, den selbstgeführten Stromrichter derart ansteuert, dass das Drehmoment des Asynchronmotors (ASM) mit einer Rampenfunktion gesteuert und langsam auf Null heruntergefahren wird.

2. Windenergieanlage nach Anspruch 1, wobei die Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) einen Widerstand aufweist, in dem die elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird.

3. Windenergieanlage nach Anspruch 1 oder 2, wobei, wenn die Steuer- und Regeleinrichtung (LGSR, LNSR, VSt) eine Überschreitung einer maximalen Leistung (P_{max1}) durch die aktuelle Ausgangsleistung (P) am Ausgang des Netzstromrichters (NSR) erfasst, ein entsprechendes Signal an die Anlagensteuereinrichtung (AS) ausgegeben wird, und die Anlagensteuereinrichtung (AS) ansprechend auf dieses Signal die Differenzleistung ($P - P_{max1}$) der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie zuführt.

4. Windenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 3, wobei in dem selbstgeführten Stromrichter Hochleistungsschalter mit parallel angeordneter Freilaufdiode verwendet werden.

5. Windenergieanlage nach Anspruch 4, wobei die Hochleistungsschalter in IGBT-Technologie aufgebaute Integrated power Module (IPM) sind.

6. Windenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 5, wobei die Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) derart dimensioniert ist, dass innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums eine vorbestimmte Anzahl von Malen eine Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie möglich ist.

7. Verfahren zur Betreiben einer Windenergieanlage, mit einem Rotor mit verstellbaren Rotorblättern, einer durch den Rotor über eine Welle angetriebenen Asynchronmaschine (ASM), einem selbstgeführten Stromrichter, der einen Generatorstromrichter (GSR), einen Zwischenkreis (ZK) mit einer Momentanüberspan-

nungsbegrenzungseinrichtung (BC) sowie einen Netzstromrichter (NSR) aufweist, der zwischen die Asynchronmaschine (ASM) und einen Mittelspannungsrafo (MST) und eine diesem nachgeschaltete Mittelspannungsschaltanlage (MSS) geschaltet ist, und einer Steuer- und Regeleinrichtung (LGSR, LNSR, VSt), zur Erfassung eines Netzausfalls und zur Ermittlung, ob ein Netzausfall länger als eine vorbestimmte erste Zeitdauer (t_{max}) andauert, und zur Ausgabe eines diese Informationen anzeigenden Signals an eine Anlagensteuereinrichtung (AS), wobei die Anlagensteuereinrichtung (AS) ausgebildet ist zur Ansteuerung einer Energieerzeugung durch die Asynchronmaschine (ASM), zur Ansteuerung des selbstgeführten Stromrichters und zur Ansteuerung der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC), mit den Schritten vor einem Einschalten oder nach einem Abschalten der Windenergieanlage Betreiben einer Leittechnik in einem Betriebszustand ohne Netz über eine Backup-Batterie, nach einem Zuschalten der Mittelspannung Versorgen aller notwendigen Hilffssysteme mit der Netzspannung, Aufladen eines Zwischenkreises des selbstgeführten Stromrichters über eine Vorladeeinrichtung auf einen Spitzenwert der aktuellen Netzspannung und Einschalten eines Hauptschützes des Stromrichters, wobei ein Netz- und ein Generatorstromrichter nicht getaktet sind, Erfassen einer Windgeschwindigkeit durch die Anlagensteuerung (AS) und bei Überschreiten eines unteren Grenzwerts der Windgeschwindigkeit Geben eines Startbefehls an eine Verbindungssteuereinrichtung und Antakten des Generator- und Netzstromrichters (GSR, NSR), so dass eine Zwischenkreisspannung (Zk) auf einen Nennwert eingestellt wird und die Windenergieanlage sich im Normalbetrieb befindet, während des Normalbetriebs des Windenergieanlage Erfassen, ob ein Netzausfall vorliegt, durch die Steuer- und Regeleinrichtung (LGSR, LNSR, VSt), und,

- wenn der Netzausfall kürzer als die vorbestimmte erste Zeitdauer (t_{max}) ist, konstant Halten der Leistung im Zwischenkreis (ZK) und Ansteuern der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) derart, dass die Leistung im Zwischenkreis (ZK) anstelle dem Netzstromrichter (NSR) der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) zugeführt und dort die elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird, oder
- wenn der Netzausfall länger als die vorbestimmte erste Zeitdauer (t_{max}) ist, Ansteuern einer Verstelleinrichtung für die Rotorblätter derart, dass der Rotor über eine Verstellung der Rotorblätter in einem Trudelbetrieb gefahren wird, und Ansteuern des selbstgeführten Stromrichters derart, dass das Drehmoment des Asynchronmotors (ASM) mit einer Rampenfunktion gesteuert und langsam auf Null heruntergefahren wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch den weiteren Schritt Erfassen einer aktuellen Ausgangsleistung (P) am Ausgang des Netzstromrichters (NSR) und bei Überschreitung einer maximalen Leistung (P_{max1}) durch die aktuelle Ausgangsleistung (P) am Ausgang des Netzstromrichters (NSR) Ausgeben eines entsprechenden Signals an die Anlagensteuereinrichtung (AS), und ansprechend auf dieses Signal durch die Anlagensteuereinrichtung (AS) Zuführen der Differenzleistung ($P - P_{max1}$) zur Momentanüberspan-

nungsbegrenzungseinrichtung (BC) zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, wobei im Fall, dass eine Netzunterbrechung mit einer Zeitdauer unter der vorbestimmten ersten Zeitdauer (t_{max}) innerhalb einer vorbestimmten zweiten Zeitdauer häufiger als eine vorgegebene Anzahl von Malen auftritt, eine Abschaltung wie bei einer Netzunterbrechung über der vorbestimmten ersten Zeitdauer (t_{max}) erfolgt, bis der Widerstand der Momentanüberspannungsbegrenzungseinrichtung (BC) unter eine vorbestimmte Temperatur abgekühlt ist.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

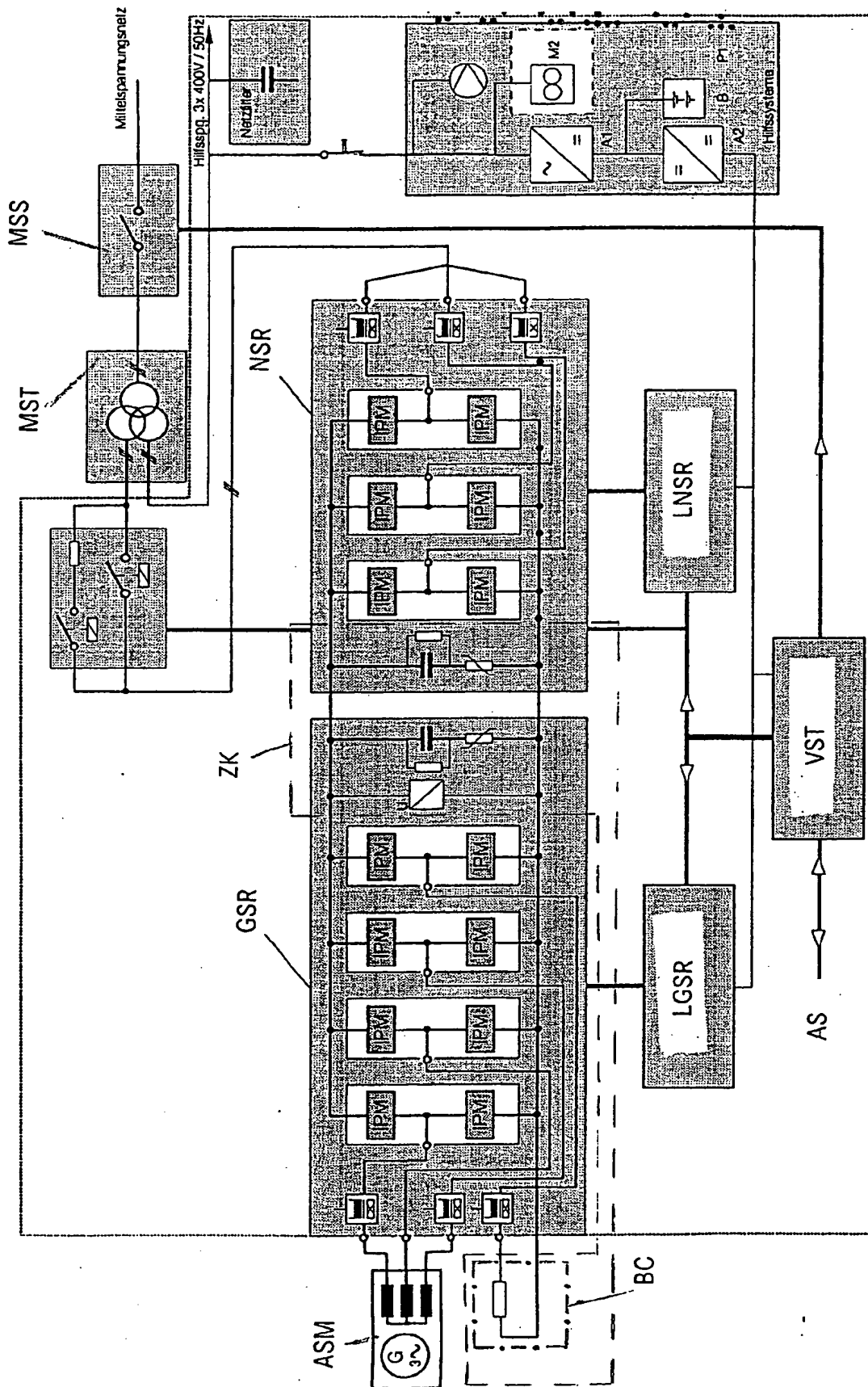


Fig. 1

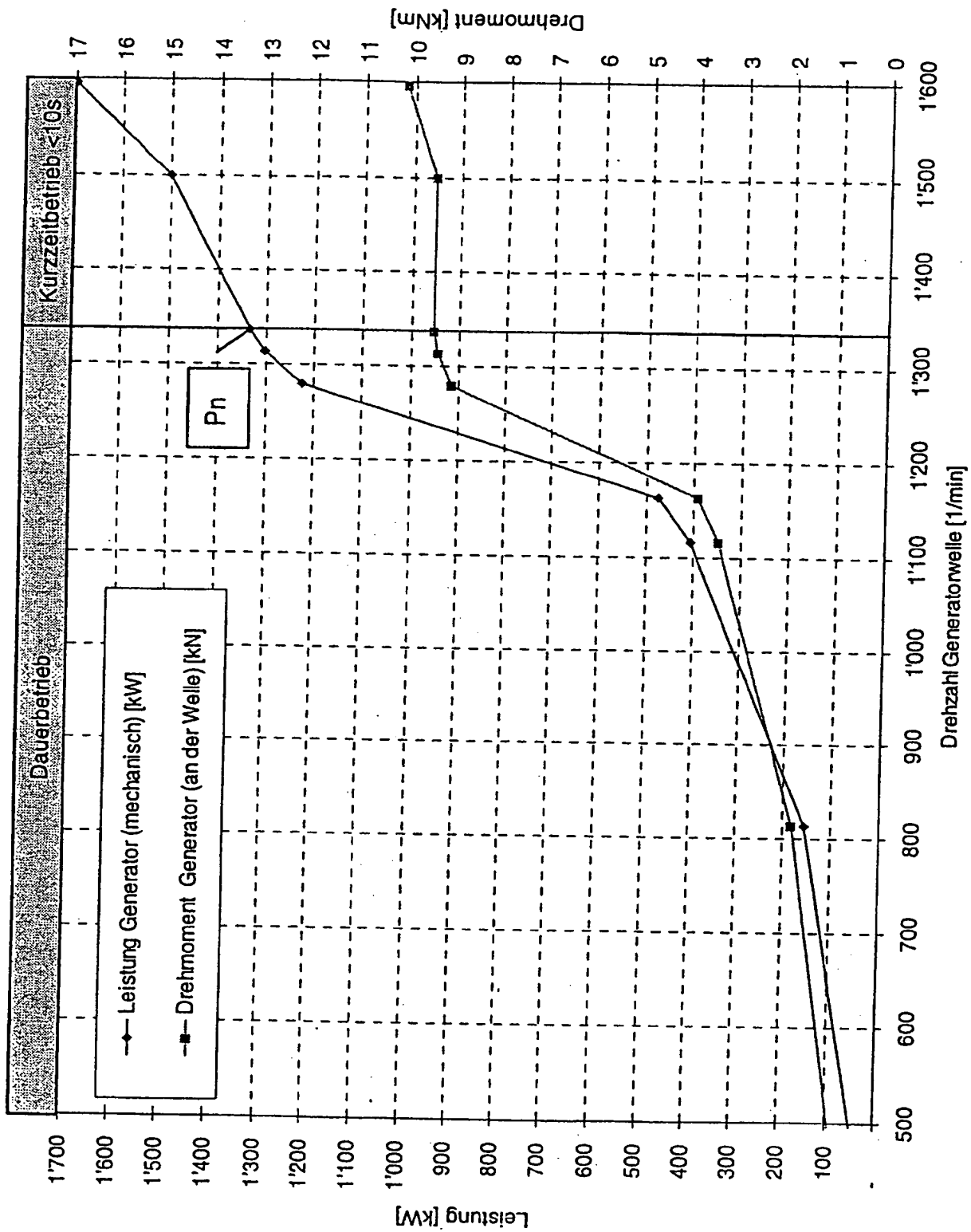


Fig. 2

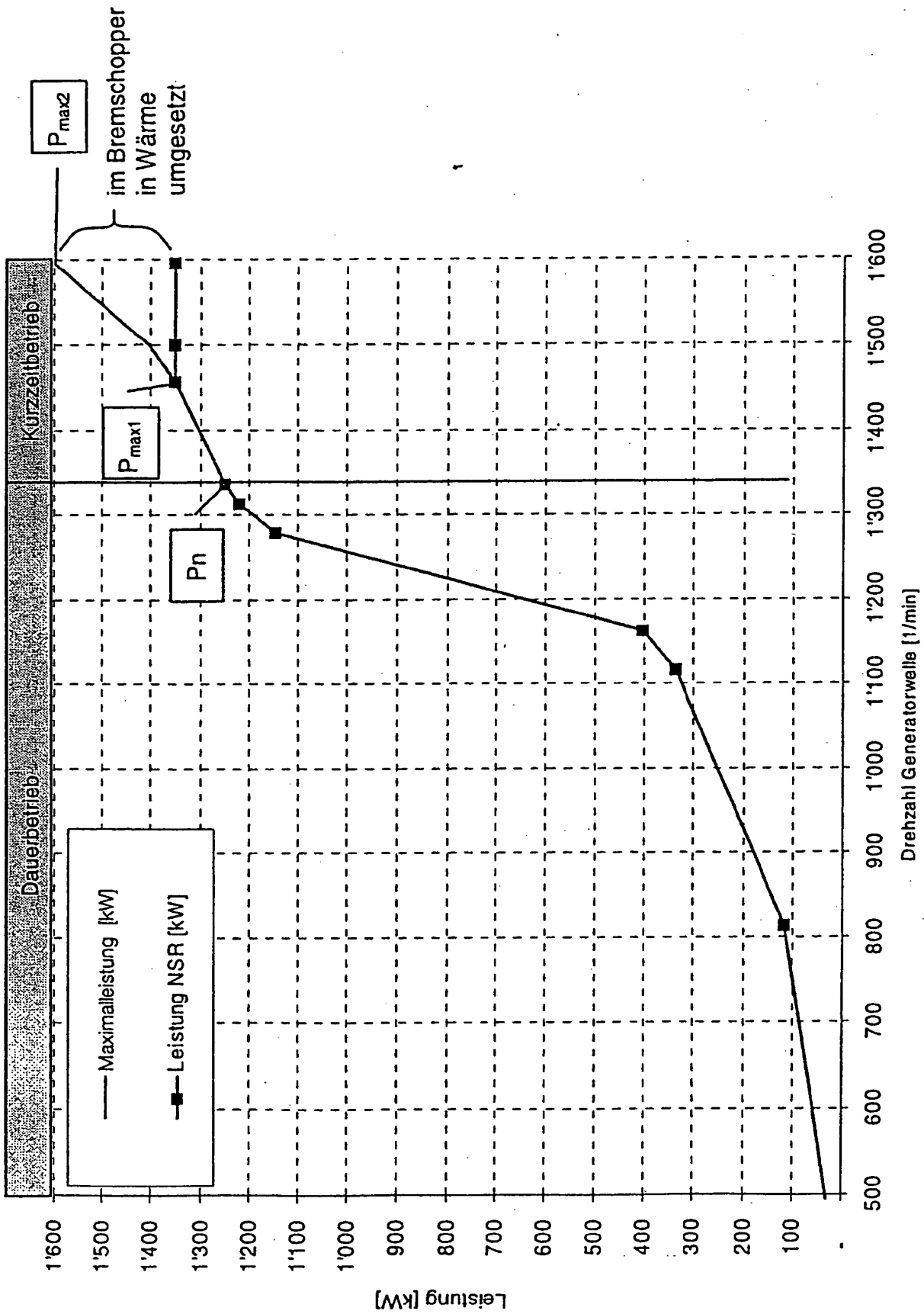


Fig. 3

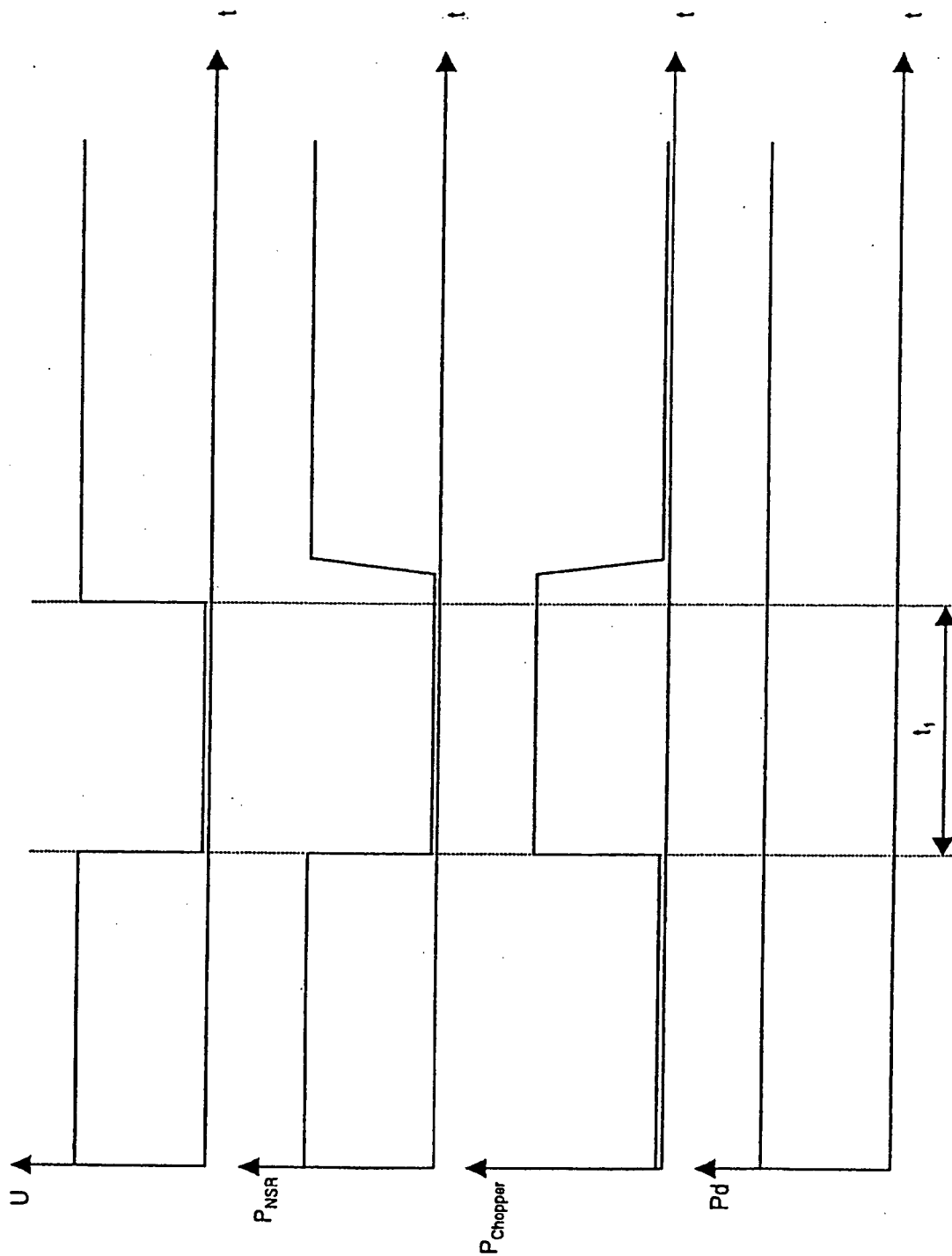


Fig. 4

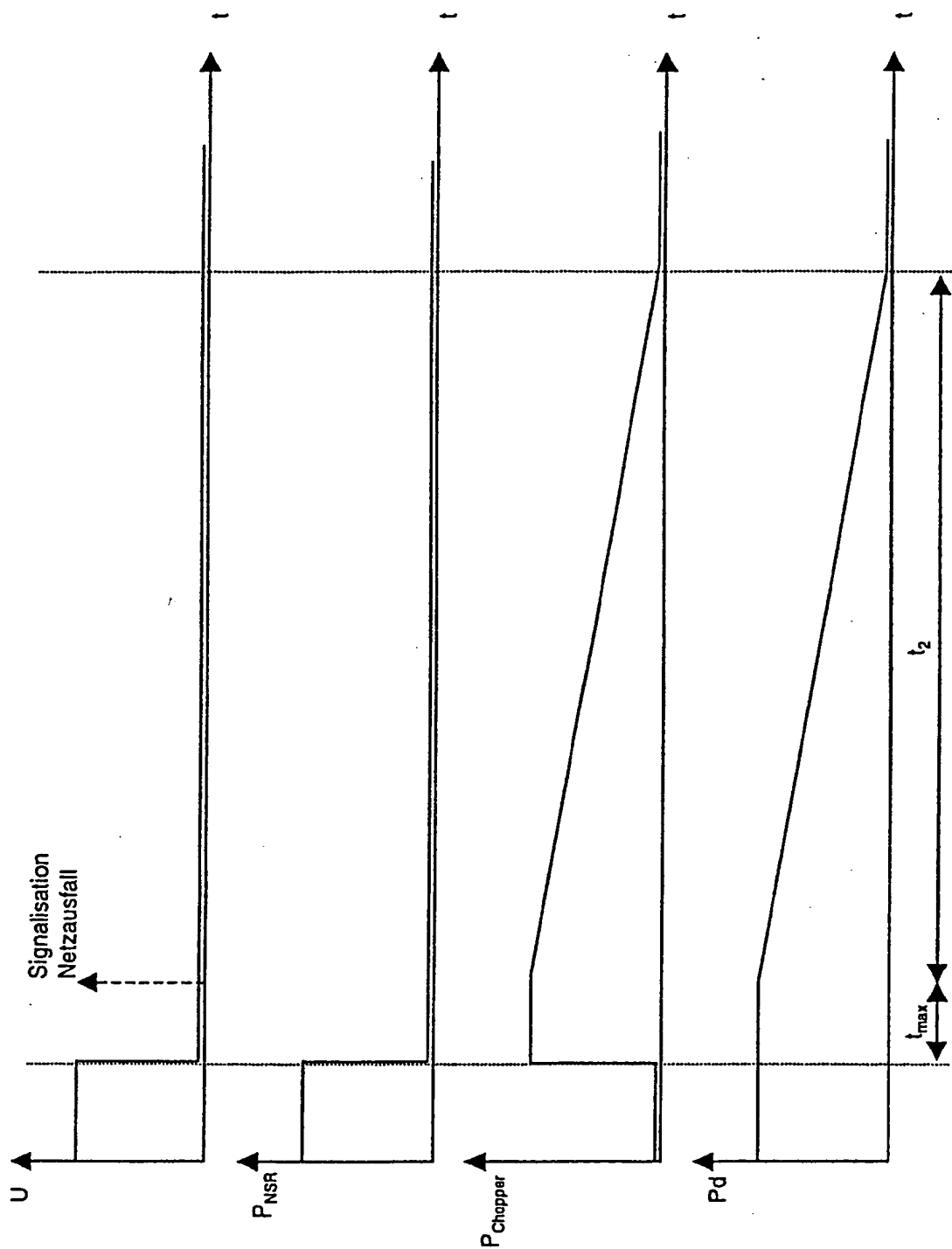
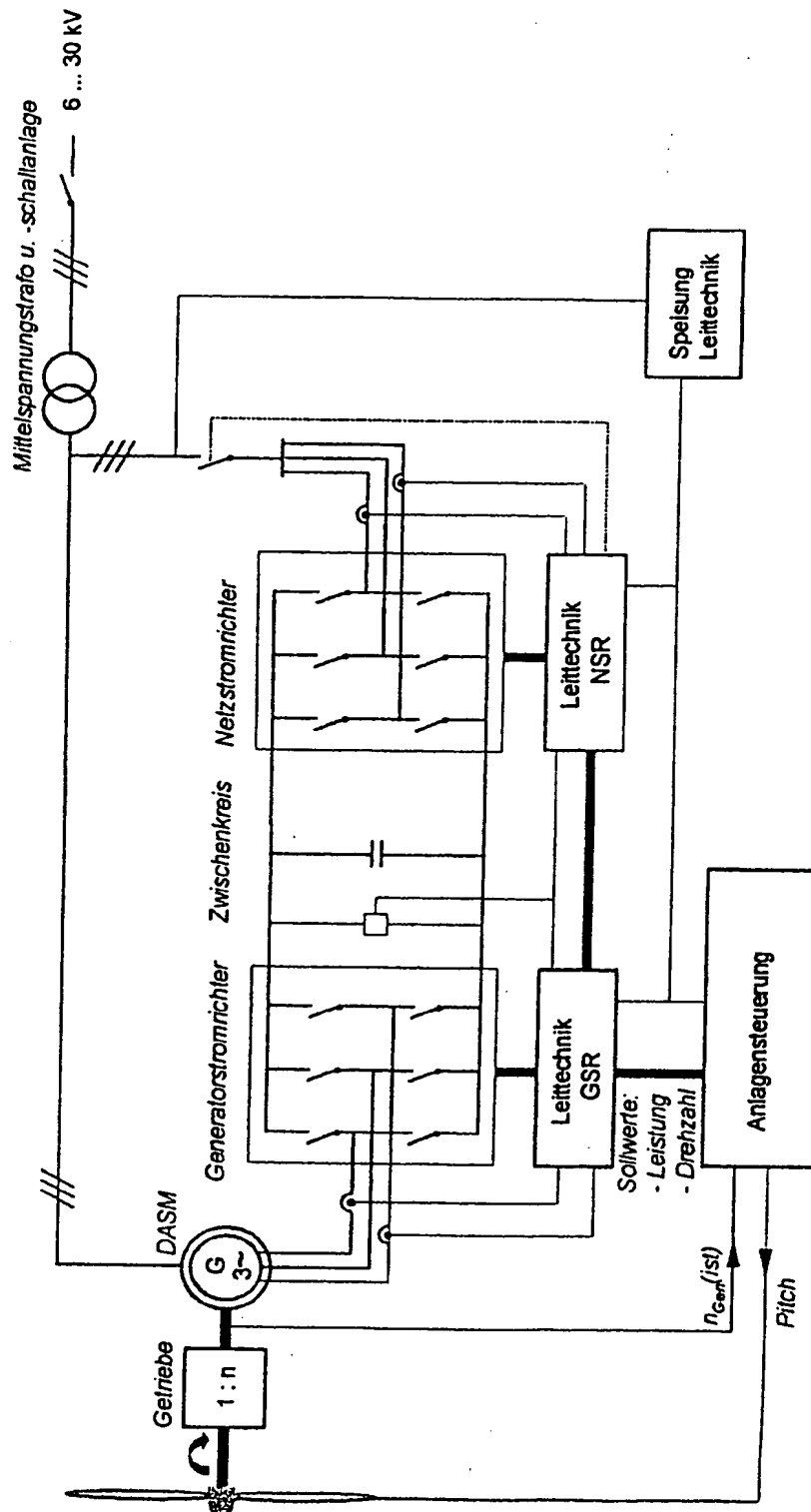


Fig. 5



File 6

Stand der Technik

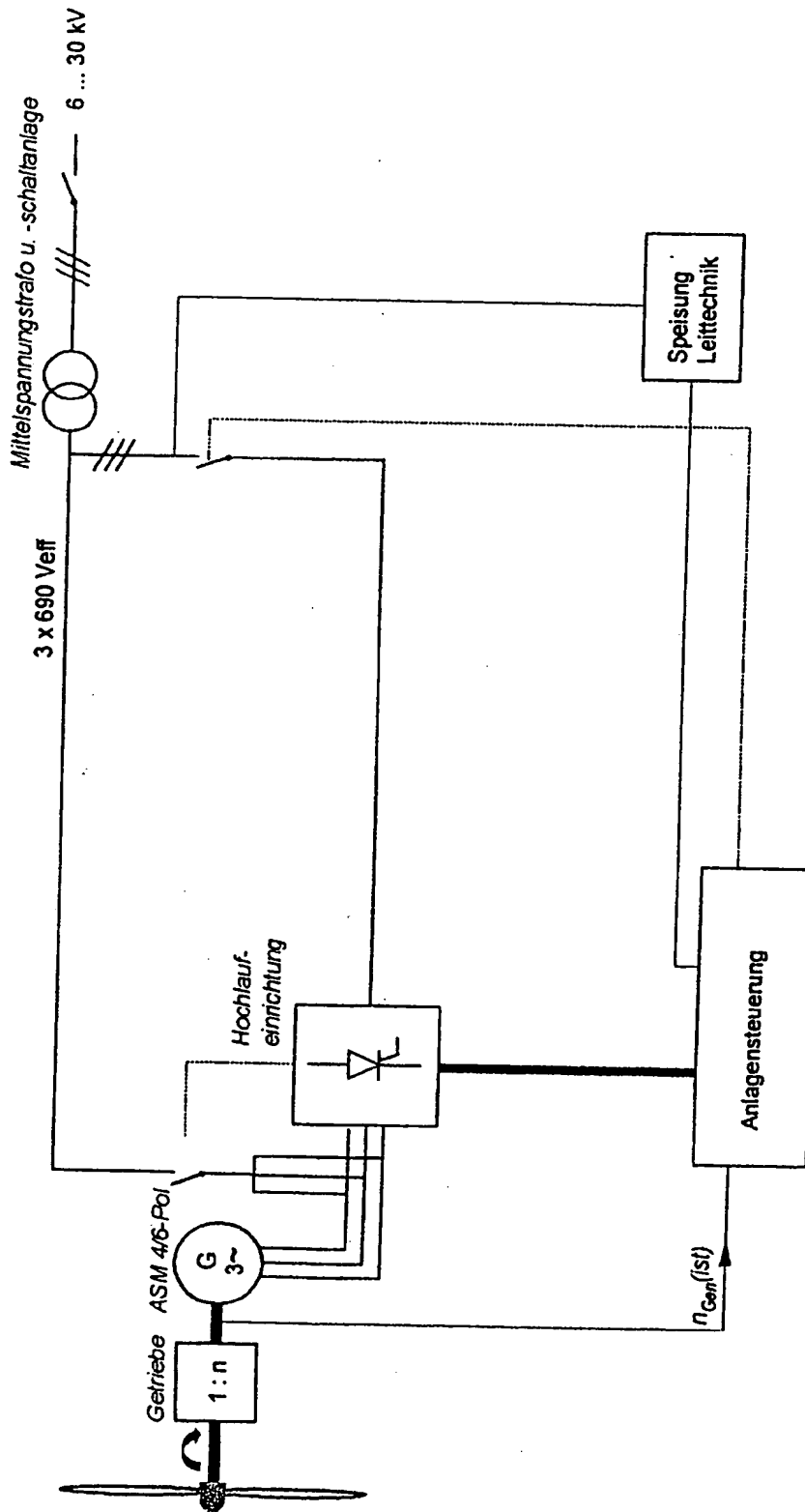


Fig. 7
Stand der Technik